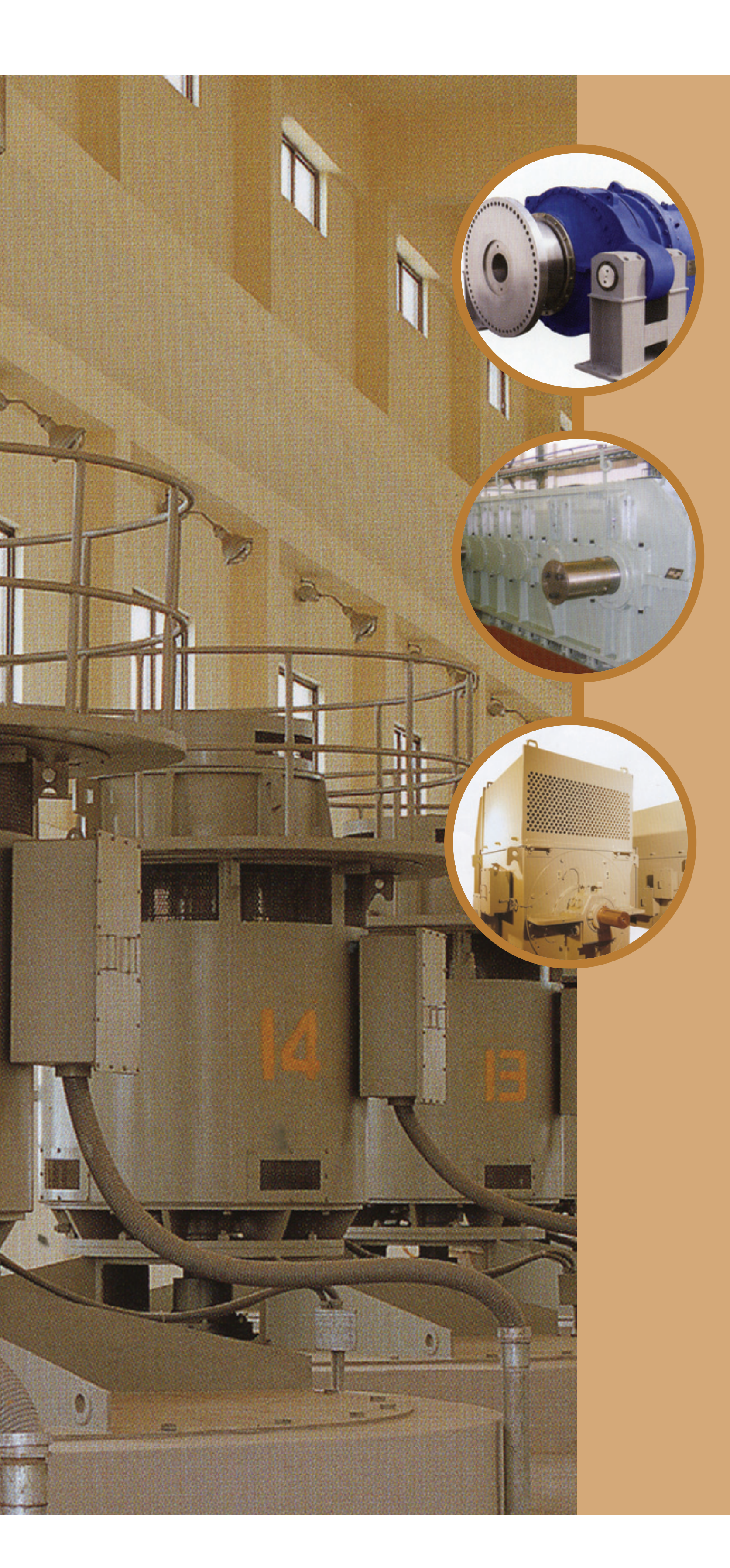


IV 동기기

1. 동기기의 원리와 구조
2. 동기 발전기의 특성
3. 동기 전동기의 특성과 특수 전동기



동기기(synchronous machine)는 정상 운전 상태에서 전원 주파수에 동기하여 회전자가 동기 속도로 회전하는 교류기이며 동기 발전기(synchronous generator)와 동기 전동기(synchronous motor)가 있다. 발전기와 전동기는 동일한 구조로 되어 있으며, 전동기는 일정 속도의 비교적 낮은 회전수로 큰 출력이 요구되는 부하에 이용된다.

동기 발전기는 교류 발전기(AC generator)라고도 하며, 소용량의 발전기로부터 대용량까지 제작하여 전 세계적으로 주된 전력 공급용 발전기로 사용되고 있다.

동기 전동기는 높은 운전 효율, 신뢰성, 제어 등을 요구하는 제련소, 발전소 등의 대형 전력 응용 분야에서 주로 사용되고 있다. 또, 펌프, 압축기, 팬, 분쇄기와 같이 큰 부하용 전동기로 사용된다.

최근에는 반도체 분야의 발전으로 전압과 주파수를 제어하는 스위칭 구동 회로를 적용하여 주파수 조절을 통한 정속도, 고속도 등의 정밀 속도 제어를 요구하는 분야에서도 많이 사용되고 있다.

이 단원에서는 동기 발전기와 전동기의 원리와 구조 운전 특성과 특수 전동기에 대하여 학습하도록 한다.



동기기의 원리와 구조

학습 목표 |

1. 동기기의 발전 원리를 설명할 수 있다.
2. 전기자 반작용을 설명할 수 있다.
3. 동기 발전기의 등가 회로와 특성을 설명할 수 있다.

1 동기기의 구조와 원리

1. 동기기의 구조

동기 발전기와 동기 전동기는 동일한 구조로 되어 있다. 동기 발전기의 구조는 전기자로 불리는 고정자가 있으며, 유도 전동기의 고정자와 동일하다. 3상 전원이 공급되면 유도 전동기와 마찬가지로 회전 자계가 발생한다.

회전자에 감겨 있거나 또는 회전자 면에 설치되어 있는 코일에 직류 전원을 공급하면 전자석이 되며, 이 전자석의 극과 고정자 회전 자계의 반대 방향의 극이 만나 동기 속도를 유지한다. 회전자의 극수는 고정자의 극수와 동일하게 만들어진다.

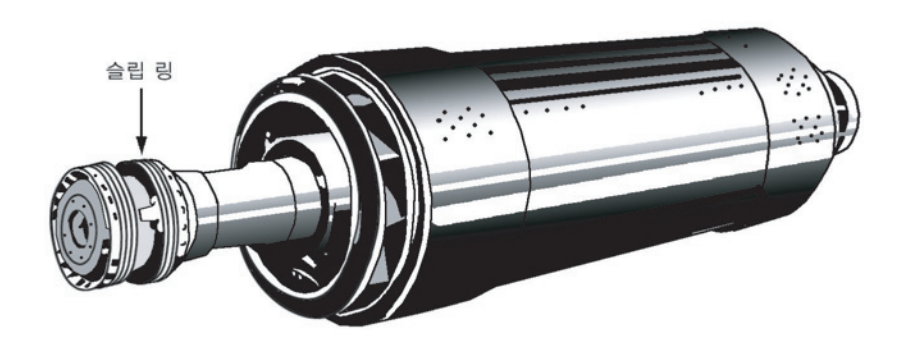


그림 Ⅳ-1 2극 원통형 회전자 구조의 고속 동기기

(1) 동기기의 원통형 고속 회전자의 구조

그림Ⅳ-1은 2극 60 Hz 원통형 회전자를 가진 고속 동기기의 회전자이며, 고속 운전에 의한 큰 원심력을 견딜 수 있게 강철 단조로 만들어진다. 원통형 회전자는 큰 관성을 가진 부하를 회전시키기 힘들기 때문에 펌프, 팬, 송풍기와 같이 낮은 기동 토크가 요구되는 분야에 제한적으로 사용된다.

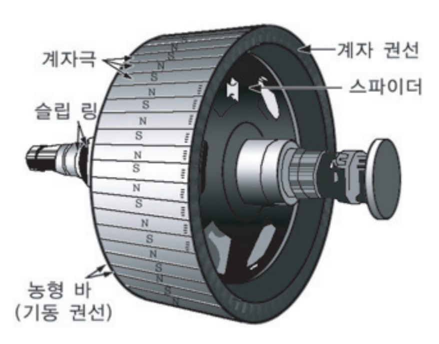


그림 Ⅳ-2 돌극형 회전자 구조의 저속 동기기

(2) 동기기의 돌극형 저속 회전자 구조

그림 Ⅳ-2는 돌극형 회전자를 가진 저속 동기기의 회전자이다. 큰 관성 저속의 부하에 맞게 제작된 동기 전동기는 철 스파이더에서 반경 방향으로 돌출한 여러 개의 극을 가지고 있다. 이러한 돌극들은 스파이더에 볼트 또는 키를 이용하여 고정되며, 스파이더는 축에 키를 이용하여 고정된다.

제동 권선이라고 불리는 농형 권선은 회전자를 가속시켜 동기 속도에 가까운 속도로 회전시키는 데에 사용된다. 제동 권선은 왕복 운동을 하는 압축기와 같은 부하에서 발생되는 토크 맥동에 의한 진동을 억제하게 도와주는 역할도 한다. 회전자가 진동하는 동안 제동 권선에 발생되는 전류는 진동을 억제하는 방향으로 역토크를 발생시킨다.

계자 권선이라고도 불리는 여자 권선은 회전자극을 만들어 준다. 각각의 계자 코일은 S극, N극이 순차적으로 나타나게 직렬 또는 직병렬로 연결된다. 회전자 회로는 슬립 링에서 끝나며, 슬립 링에 접촉되는 흑연 브러시를 통하여 계자 권선이 직류의 여자 전원에 연결된다.

그림 Ⅳ-3은 직류 여자기가 축에 설치된 돌극형 회전자이다. 직류 여자기의 회전자에 있는 전기자에서 발생된 직류 전류는 여자기의 정류자 편을 지나 흑연 브러시와 슬립 링을 통하여 동기기의 회전자에 있는 계자 권선에 제공된다.

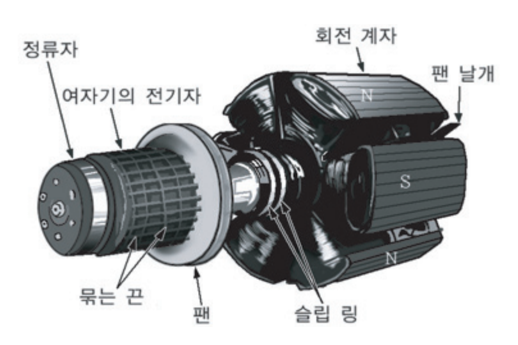


그림 Ⅳ-3 직류 여자기가 축에 설치된 회전자의 구조

(3) 브러시리스 동기기의 회전자 구조

그림 Ⅳ－4는 브러시가 없는 브러시리스 여자 시스템을 가지고 있는 돌극형 회전자이다. 브러시리스 전동기의 여자는 동일한 축에 설치되어 있는 소형 3상 여자기의 전기자, 3상 정류기, 제어 회로에 의하여 이루어진다.

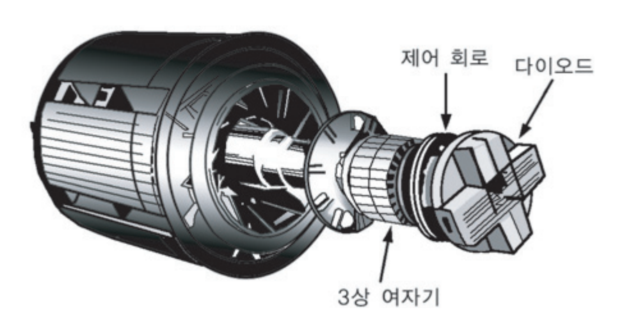


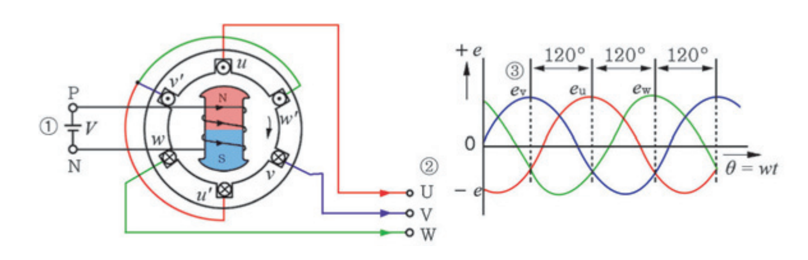
그림 Ⅳ－4 브러시리스 돌극형 회전자의 형상

2 동기 발전기의 발전 원리

1. 교류 기전력의 발생

일반적으로 동기기는 동기 발전기를 말하며, 그림 Ⅳ－5처럼 나타낼 수 있다. 그림 Ⅳ－5의 (a)와 같이 내부 회전자에서 N－S의 극을 만들기 위하여 여자 코일을 권선하여 직류 전압 V를 가한 후, 이 자극을 동기 속도로 회전시킨다. 이때, 고정자의 권선 u－u′에서는 1상의 전자 유도 기전력이 발생한다. 이를 회전 계자형(rotating－field type) 동기 발전기라고 한다.

u 상의 유도 기전력 e_u는 사인파의 교류 기전력으로 되고, 120° 전기각으로 배치되어 있는 전기자 3상 권선 u, v, w에서는 그림 Ⅳ－5의 (b)와 같이 평형 3상 파형 e_u, e_v, e_w가 발전되어 출력된다.



(a) 2극 회전 계자형 3상 동기 발전기 (b) 3상 교류 기전력

그림 Ⅳ－5 3상 동기 발전기의 교류 기전력

2. 동기 속도와 극수

3상 동기 발전기의 회전자 극은 N극과 S극 뿐이며 극수 p는 2극이다. 1회전하면 1상 u−u′ 상에서 출력되는 전기자 출력 파형은 1주기(cycle)가 된다. 따라서, 회전자의 극수 p가 4극인 경우에는 전기자 1상의 1회전 출력 파형은 2주기가 된다. 즉, 1주기 수는 $\frac{p}{2}$가 되므로 초당의 주기 수인 주파수 f는 $\frac{p}{2}$[Hz]가 된다.

극수가 p인 회전자가 초당 회전수 n_s[rps]로 회전할 때에 주파수는 $f=\frac{p}{2}n_s$[rps]이고, 분당 회전수 N_s[rpm]으로 회전할 때의 고정자의 전기자 권선 출력 파형의 주파수 f[Hz]는 다음과 같다.

$$f=\frac{p}{2}\times\frac{N_s}{60}\text{[Hz]} \qquad (\text{Ⅳ}-1)$$

극수가 p인 발전기가 주파수 f[Hz]의 기전력을 발생시키기 위한 동기 속도 N_s는 다음과 같다.

$$N_s=\frac{120f}{p}\text{[rpm]} \qquad (\text{Ⅳ}-2)$$

그러므로 동기 발전기의 동기 속도 N_s는 주파수 f에 비례하고 동기 발전기의 회전자 극수 p에 반비례함을 알 수 있다.

3 전기자 반작용

그림 Ⅳ−6과 같이 3상 회전 계자형 동기 발전기에 평형 3상 부하 Z를 접속하고 회전자를 동기 속도 N_s[rpm]로 회전시키면 전기자 권선 역할을 하고 있는 고정자로부터 부하에 전류 i_u, i_v, i_w가 각각 흐르게 된다.

부하 전류는 전기자 권선에 폐루프로 흐르면서 전기자 권선 자체의 자기력선속 Φ_a를 그림 Ⅳ−6의 발전기 공극 내에 발생시킨다.

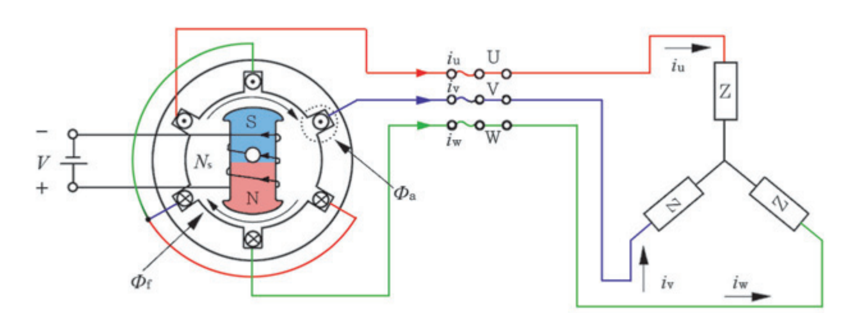


그림 Ⅳ−6 부하가 있는 3상 동기 발전기

동기 속도로 회전하는 회전자에 의한 자기력선속 Φ_f와 전기자(고정자) 회전 자기력선속 Φ_a는 같은 속도로 회전한다. Φ_a는 유도 기전력 E와 전류 I의 위상차에 의하여 약간 늦게 일정한 관계를 유지하면서 회전한다.

이때, 부하 전류에 따라 변하는 유도 기전력 E와 전류 I의 위상차에 의하여 전기자 쪽 Φ_a는 회전자 계자 쪽 Φ_f에 일정한 크기의 영향을 주게 되므로, 출력되는 유도 기전력을 변화시키게 된다.

이와 같은 현상을 전기자 반작용(armature reaction)이라고 하고 교차 자화 작용, 감자 작용, 증자 작용으로 분류된다.

1. 교차 자화 작용

부하가 순저항 부하로서 $Z_R=R$인 때는 E와 I가 동위상 $\theta=0$일 때이다. 그림 Ⅳ-7에서 동위상 $\theta=0$일 때, 회전자의 계자극 N극 앞에 위치한 전기자 전류의 방향은 $i_{\otimes}$은, S극 앞에 위치한 $i_{\odot}$인 전류 I에 의한 자체 유도 자기력선속 Φ_a가 각각 그림 Ⅳ-7과 같이 발생되고, 회전자 쪽에서 발생되는 자기력선속 Φ_f는 최대 밀도로 교차 자화된다.

이때, 자기력선속 밀도는 그림 Ⅳ-7에서 N극과 S극의 왼쪽으로 밀리고, 자기력선속 밀도가 증가되어 증자 작용이 있게 된다. 반면에 오른쪽에서는 감자 작용이 된다.

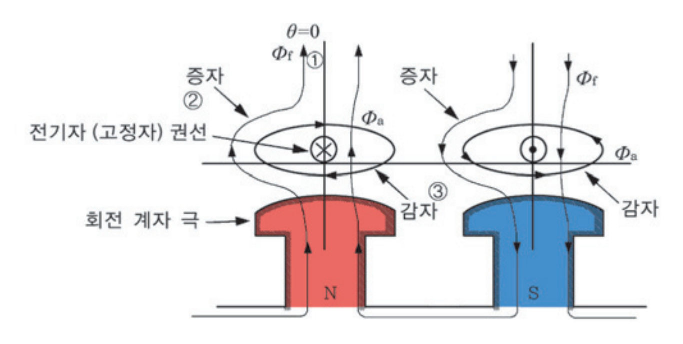


그림 Ⅳ-7 전기자 반작용(교차 자화 작용)

2. 감자 작용

동기 발전기의 부하를 $Z_L=\omega L$의 인덕턴스 부하로 접속하였을 경우, 그림 Ⅳ-8과 같이 전기자 전류는 유도 기전력 E에 대하여 90° 지상이므로 $i_{\otimes}$가 N극보다 90° 왼쪽의 위치에 있게 된다. 전기자 전류에 의한 유도 자기력 선속 Φ_a가 회전자 자기력선속 Φ_f에 대하여 반대 방향으로 N극과 S극의 양쪽으로 흐르게 되어 서로 감자 작용을 한다.

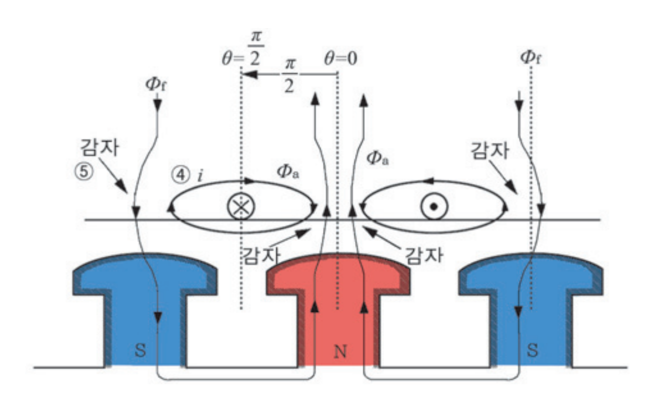


그림 Ⅳ-8 전기자 반작용(감자 작용)

3. 증자 작용

부하를 $Z_L=\frac{1}{\omega c}$인 캐패시턴스 부하를 접속하였을 경우, 그림 Ⅳ-9에서 전기자의 부하 전류 i는 90° 진상 전류가 된다. 이때, Φ_f에 대하여 i에 의한 유도 자기력선속 Φ_a가 90° 앞서게 되어 증자 작용을 한다.

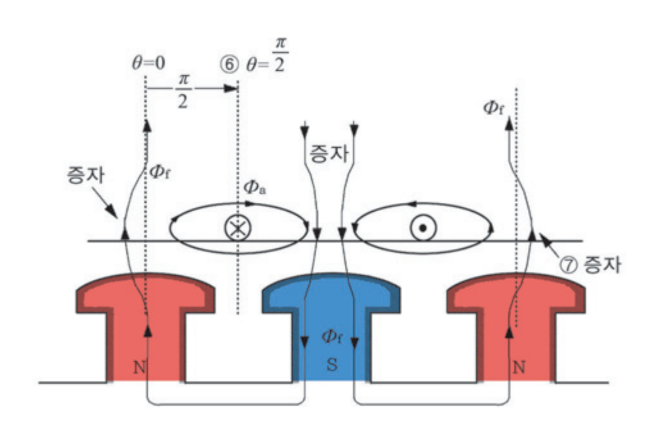


그림 Ⅳ-9 전기자 반작용(증자 작용)

이상과 같은 세 종류의 전기자 반작용은 회전자의 주자기력선속을 가변시키므로 전기자 반작용 리액턴스(armature reaction reactance) x_a가 직렬로 접속된 것으로 볼 수 있다. 또, 전기자 유도 기전력은 그 주위의 전기자 도체들을 쇄교하므로 누설 리액턴스 x_l이 있다고 간주되어 리액턴스의 합 x_s는 다음과 같이 증가된다.

$$x_s=x_a+x_l\,[\Omega] \qquad (\text{Ⅳ}-3)$$

를 동기 리액턴스라고 한다. 전기자 권선의 저항을 r_a라고 할 때,

$$Z_s=r_a+jx_s\,[\Omega] \qquad (\text{Ⅳ}-4)$$

를 동기 임피던스라고 하여 동기 발전기에서 기본적인 자체 임피던스가 된다.

4 동기 발전기의 등가 회로

1. 등가 회로와 벡터도

식 Ⅳ－3, 식 Ⅳ－4와 그림 Ⅳ－7, 8, 9로부터 1상의 동기 발전기 등가 회로를 나타내면 그림 Ⅳ－10의 (a)와 같다.

그림 Ⅳ－10의 (a)의 등가 회로에서 동기 임피던스 Z_s는

$$Z_s = r_a + jx_s \,[\Omega] \qquad (Ⅳ-5)$$

가 된다. 부하 전류가 I일 때에 동기 임피던스 강하 V_z는

$$V_z = I(r_a + jx_s)\,[V] \qquad (Ⅳ-6)$$

로 되고, 이때 동기 발전기의 단자 전압은 유도 기전력로부터

$$V = E - V_z = E - (I \cdot r_a + I \cdot x_s)\,[V] \qquad (Ⅳ-7)$$

로 된다. 그리고 그림 Ⅳ－10의 (b)와 같은 순서에 의하여 벡터도가 그려진다.

단자 전압 V가 기준 벡터이며 그림 Ⅳ－10의 (b)－1과 같이 나타낸다. 그리고 유도성 부하에 의한 선로 전류 I가 θ만큼 지상으로 흐름을 알 수 있다.

그림 Ⅳ－10의 (b)－2에서 $\dot{V}r_a = r_a\dot{I}$의 전기자 권선 저항 강하 전압이 $\dot{I}$와 동위상으로 그려지고, 그림 Ⅳ－10의 (b)－3에서 저항분 r_a에 대하여 동기 리액턴스 x_s는 직각으로 결합되어 그림 Ⅳ－10의 (b)－4에서 동기 임피던스 강하 $\dot{V}_z$를 만든다.

그림 Ⅳ－10의 (b)－5에서 발전기는 $\dot{V} + \dot{V}_z$의 기전력 E를 발전한다. 이때, 부하각 δ가 단자의 출력 E를 결정한다.

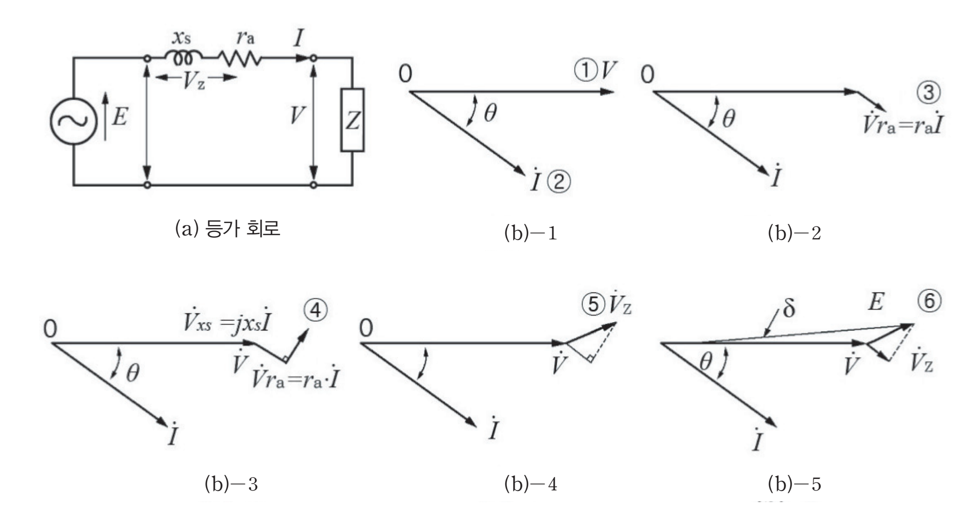


그림 Ⅳ－10 동기 발전기의 등가 회로와 벡터도

2. 동기 발전기의 출력

동기 발전기는 출력 전류가 큰 것을 목적으로 하므로, r_a는 x_s에 비하여 매우 작다. 그림 Ⅳ-10의 (b)-5에서 동기 발전기의 1상 단자 출력 P_s는

$$P_s = VI\cos\theta\,[\mathrm{W}] \quad (Ⅳ-8)$$

로 된다.

그러나 그림 Ⅳ-10의 (b)-5의 벡터도에서 전기자 저항을 $r_a \cong 0$으로 할 때, $\dot{V}_x = \dot{V}_z$로 되며, $E\sin\delta = x_s I\cos\theta$, $I\cdot\cos\theta = \dfrac{E}{x_s}\sin\delta$가 된다. 그러므로 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$P_s = V\cdot I\cos\theta = V\cdot\frac{E}{x_s}\sin\delta = \frac{V\cdot E}{x_s}\sin\delta\,[\mathrm{W}] \quad (Ⅳ-9)$$

여기서, 1상 부하 단자 전압 V, 발전기 1상 유도 출력 전압 E, x_s가 일정하면, 출력 P_s는 $\sin\delta$에 비례한다. 발전기의 기전력 E의 위상각 δ를 부하각이라고 하고, 이론상 90°까지 허용된다.

또, 선간 기전력과 단자 전압을 각각 E_L, V_L이라고 하면 3상 Y결선 기준으로 $E = \dfrac{E_L}{\sqrt{3}}$, $V = \dfrac{V_L}{\sqrt{3}}$이 되므로, 3상 동기 발전기의 선간 전 출력 P_{s3}은 식 Ⅳ-9로부터 다음과 같이 된다.

$$P_{s3} = 3\frac{E_L}{\sqrt{3}}\frac{V_L}{\sqrt{3}}\frac{\sin\delta}{x_s} = \frac{E_L V_L}{x_s}\sin\delta\,[\mathrm{W}] \quad (Ⅳ-10)$$

예제 1 동기 리액턴스 $x_s = 10[\Omega]$, 전기자 저항 $r_a = 0.1[\Omega]$인 Y 결선의 3상 동기 발전기가 있다. 3상 중에서 1상의 단자 전압은 $V = 4000[\mathrm{V}]$이고, 유도 기전력은 $E = 6400[\mathrm{V}]$이다. 부하각은 $\delta = 30°$라고 하고 발전기의 출력을 계산하여 보자.

풀이 |

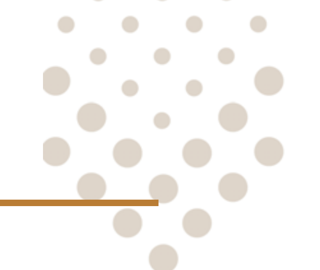
r_a는 x_s에 비하여 매우 적으므로 r_a를 무시하면 다음 식에 의하여 3상 선간 출력 P_{s_3}를 구한다.

$$P_{s_3} = 3\cdot P_s = 3\times\frac{E\cdot V}{x_s}\sin\delta = 3\times\frac{6400\times4000}{10}\sin30 = 3840$$

$$\left(V = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 4000[\mathrm{V}],\ E = \frac{E_L}{\sqrt{3}} = 6400[\mathrm{V}]\right)$$

이다.





동기 발전기의 특성

학습 목표 |

1. 3상 동기 발전기의 무부하와 단락 특성을 설명할 수 있다.
2. 동기 임피던스를 이해하고 계산할 수 있다.
3. 동기 발전기의 병렬 운전 조건을 설명할 수 있다.
4. 3상 동기 발전기의 무부하 시험과 단락 시험을 할 수 있다.

1 동기 발전기의 특성 곡선

1. 무부하 포화 곡선

동기 발전기의 무부하 포화 특성 곡선은 최고 출력과 무부하 손실을 함께 고찰하는 것으로서, 그림 Ⅳ-11의 (a)와 같은 무부하 시험 결선도로 무부하 시험을 한다.

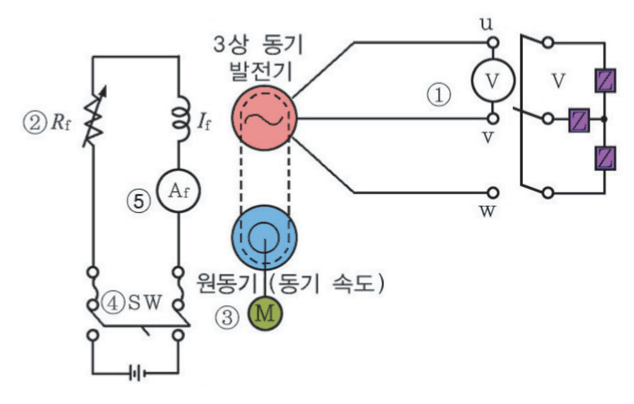
① 그림 Ⅳ-11의 (a)에서 동기 발전기 무부하 시험 결선도에 따라 무부하 상태로 한다.

② 계자 회로의 가변 저항 R_f를 최대로 놓아 계자 전류를 최소로 한다.

③ 원동기 Ⓜ의 속도를 동기 발전기의 정격 회전 속도로 회전시킨다.

④ 직류 전원의 스위치 SW를 닫아 계자 전류를 공급한다.

⑤ R_f를 감소하여 계자 전류 I_f를 점차 증가시키면서 I_f와 발전기 선간 출력 전압 V를 각각 전류계 Ⓐf와 전압계로 Ⓥ로 측정한다. 여기서, 무부하 유도 기전력과 계자 전류의 관계를 나타낸 것을 동기 발전기의 무부하 포화 곡선(no-load



C′
C
V_n
⑥
단자 전압 V
0
계자 전류 I_f

(a) 무부하 시험 결선도

(b) 무부하 포화 곡선

그림 Ⅳ-11 무부하 특성 시험

saturation curve)이라고 하며, 그림 Ⅳ-11의 (b)의 곡선 C로 나타낸다.

⑥ 곡선 C에서 전압이 낮을 때에는 유도 기전력이 계자 전류에 정비례하여 증가한다. 전압이 정격 전압 V_n으로 높아짐에 따라 계자 철심이 자기적으로 포화되어 있어서 계자 전류 I_f가 증가하여도 전압은 더 이상 증가하지 않는다.

2. 외부 특성 곡선

그림 Ⅳ-11의 (a)에서 동기 발전기에 부하 Z를 접속하여 부하 전류 I를 흐르게 한다. 계자 전류 I_f를 일정하게 유지하면서 부하의 크기, 즉 Z를 R, L, C로 바꾸어 가면서 변화시켰을 때에 단자 전압 V와 부하 전류 I의 관계를 나타내는 곡선을 외부 출력 특성 곡선(external output characteristic curve)이라고 한다.

① 그림 Ⅳ-12에서 지상 역률이 되는 유도성 부하를 증가시키면 그림 Ⅳ-12의 ①에서와 같이 $\cos\theta=0.8$(뒤짐) 곡선으로 되어 단자 전압 V는 현저하게 떨어진다.

② 다음으로 진상 역률이 되는 용량성 부하를 증가시키면 곡선 ② $\cos\theta=0.8$(앞섬)과 같이 단자 전압 V가 상승한다.

③ $\cos\theta=1$인 저항 부하가 증가될 때에는 곡선 ③과 같이 단자 전압이 일정한 것이 동기 발전기의 외부 출력 특성이다.

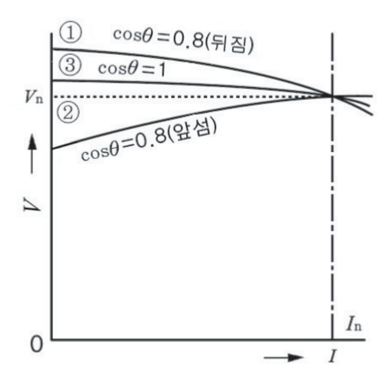


그림 Ⅳ-12 외부 출력 특성 곡선

3. 단락 곡선

그림 Ⅳ-11의 (a)에서 동기 발전기의 전기자 u, v, w 상의 출력 단자를 단락시킨다. 이후에 발전기를 정격 속도로 회전시킨다. 이때, R_f에 의하여 계자 전류를 영으로부터 변화시키면서 단락 전류와의 관계를 고찰하면 발전기의 최대 부하에 대한 내력 응답을 나타내는 그림 Ⅳ-13과 같은 단락 곡선(short circuit curve)을 구할 수 있다.

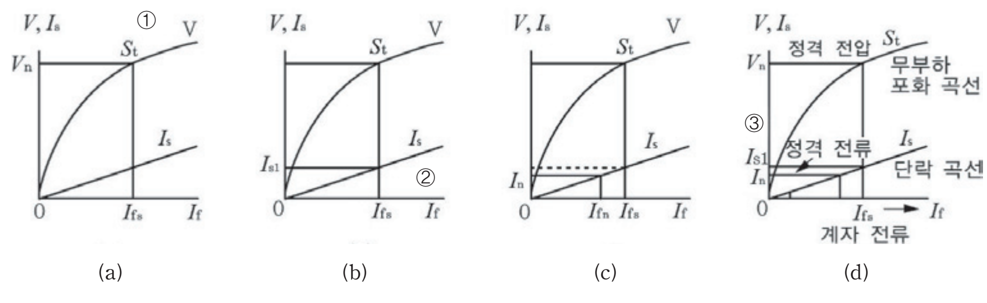


그림 Ⅳ−13 동기 발전기의 단락 곡선

① 그림 Ⅳ−11의 (b)에서 무부하 포화 곡선 S_t를 그림 Ⅳ−13의 (a)에 나타낸다.

② 그림 Ⅳ−13의 (b)에서 부하가 단락하고 R_f가 변화할 때의 단락 곡선 I_s에서 동기 발전기를 정격 속도와 정격 출력 전압 V_n을 유지시킬 수 있는 동기 계자 전류, 즉 상한 허용 계자 전류 I_{fs}와 그때의 단락 전류 I_{s1}이 결정된다.

③ 그림 Ⅳ−13의 (c)에서 부하 단락 시의 단락 전류 I_{s1}의 위험에 대하여 정격 전류 I_n를 유지할 수 있는 최소한의 허용 계자 전류 I_{fn}와 정격 전압 유지에 필요한 계자 전류 I_{fs}의 비 $\frac{I_{fs}}{I_{fn}}$를 단락비라고 한다〔그림 Ⅳ−13(d)〕.

4. 전압 변동률

전압 변동률이란 동기 발전기에서 여자 전류와 회전 속도를 일정하게 하고 설정된 역률의 정격 출력에서 무부하로 운전하였을 때의 전압 변동 비율을 말하며, 정격 단자 전압 V_n에 대한 무부하 정격 출력 전압 V_0의 비를 전압 변동률 ε라고 하면 다음과 같다.

$$\varepsilon=\frac{V_0-V_n}{V_n}\times 100[\%] \qquad (Ⅳ-11)$$

5. 발전기의 자기 여자

장거리 고압 송전 선로에 결합된 동기 발전기가 무부하로 운전이 시작될 때에는 먼저 발전기 내의 무부하 포화 곡선에 따르는 자체 축적 잔류 자기로 인하여, 초기에는 진상 전류를 만들고 약간의 단자 전압을 만든다. 이때, 선로 쪽 용량에 의한 진상 전류가 중첩되어 전기자 내에서 진상 전기자 반작용에 의하여 증자 작용이 있게 된다. 따라서, 단자 전압이 상승한다.

이때의 무부하 단자 전압은 $V_c=\sqrt{3}\frac{I_c}{2\pi fC}$가 되어, 선로 용량 전류의 증가에 따라 상호 전압이 상승되어 자기 여자된다.

2 동기 임피던스의 계산

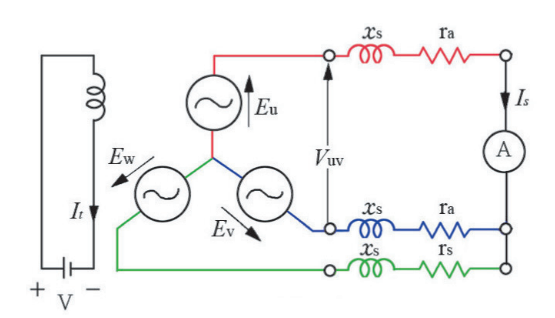
동기 발전기에서 무부하 시험에 의하여 발전기 자체의 철손 임피던스와 단락 시험을 이용한 발전기 자체의 동손과 발전 능력을 살펴본다.

그림 Ⅳ-14의 (a)는 단락 전류 특성을 측정하기 위하여 발전기 출력 쪽을 단락시킨 시험 회로이고, 전류계 Ⓐ를 이용하여 단락 전류 I_s를 측정한다. 그림 Ⅳ-14의 (b)는 무부하 포화 곡선을 측정하기 위한 무부하 시험 회로이고, 전압계 Ⓥ를 이용하여 무부하 정격 단자 전압 V_n를 측정한다.

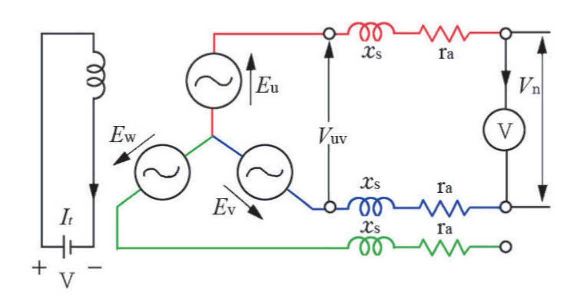
즉, 무부하 시험과 단락 시험에서 얻어진 V_n와 I_s에 의하여 그림 Ⅳ-13과 같이 계자 전류 I_f에 따라 변화하는 무부하 포화 곡선과 단락 곡선을 나타낼 수 있다.

이 두 곡선을 살펴보면, 정격 유지 계자 전류가 I_{fn}에서 출력 단락 시의 계자 전류 I_{fs}로 증가될 때에 동기 발전기의 단자 전압 V는 정격 전압 V_n가 되고, 단락 전류는 I_{s1}로 증가됨을 알 수 있다. 이때, 동기 발전기의 단락 전류에 대한 발전기 자체의 임피던스 내력을 규정짓는 백분율 동기 임피던스 $Z_{s\%}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{s\%} = \frac{Z_s I_n}{E_n} \times 100[\%] = \frac{I_n}{I_{s1}} \times 100[\%] \qquad (\text{Ⅳ}-12)$$



(a) 단락 시험 회로



(b) 무부하 시험 회로

그림 Ⅳ-14 단락 시험과 무부하 시험

3 동기 발전기의 병렬 운전

1. 병렬 운전에 필요한 조건

부하 증가에 따른 발전기의 경제적 운전과 발전기의 주기적인 보수에 유연성을 가지기 위하여 두 대 이상의 동기 발전기를 사용한다. 이와 같이, 여러 대의 동기 발전기를 함께 병렬 운전시키기 위하여는 각 발전기의 특성 중 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

(1) 유도 기전력의 주파수가 같을 것

그림 Ⅳ-15와 같이 두 대의 발전기 G_1과 G_2가 병렬 운전될 때에 발전 주파수가 서로 다르면 발전기의 순시 단자 전압이 심하게 진동한다.

이때, 상간 전압의 최댓값은 각 발전기 전압의 거의 두 배에 이르게 되고, 전기자 권선은 비정상적으로 가열된다. 이 진동 전압을 없애기 위하여는 각 발전기의 속도를 조정하여 정격 주파수의 전력이 발생하게 하여야 한다.

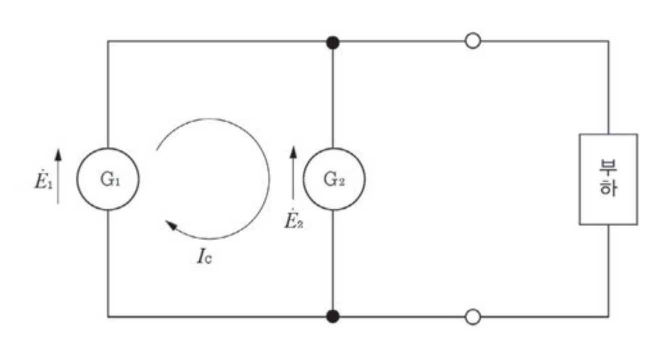


그림 Ⅳ-15 동기 발전기의 두 대 병렬 운전

(2) 유도 기전력의 크기가 같을 것

그림 Ⅳ-15와 같이 동기 발전기 두 대가 병렬로 운전되고 있을 때에 각 동기 발전기의 기전력 $\dot{E}_1$과 $\dot{E}_2$는 부하에 대하여 동위상이다. 그러나 발전기 상호간에는 서로 반발 관계에 있다.

그림 Ⅳ-15에서 운전 중에 발전기 G_1의 계자 전류가 증가하여 기전력이 $E_1 > E_2$가 되었다면, 그의 합성 기전력 $E_1 - E_2 = E_s$[V]가 전기자의 내부 회로에 작용하여 양 발전기 사이에 순환 전류 I_c가 흐르게 된다.

순환 전류 I_c는 발전기의 지연성 동기 리액턴스에 의해서 E_s보다 $\frac{\pi}{2}$의 지상 전류가 된다[그림 Ⅳ-16의 (c)]. 따라서 I_c는 G_1 발전기의 $\dot{E}_1$에 대하여는 감자 작용을 하여

전압을 내리고 G_2의 발전기에 대하여는 증자 작용을 하여 양 발전기의 유도 기전력이 다르게 되어 불평형 운전을 한다.

(3) 유도 기전력의 위상이 같을 것

두 대의 발전기 G_1, G_2의 유도 기전력 E_1, E_2의 크기가 같고, 모선에 대하여 같은 위상으로 병렬 운전을 하고 있을 때, 만약 G_1의 속도가 상승하였을 경우

1) 그림 Ⅳ−16의 (a)에서 기전력 $\dot{E}_1$은 그림 (b)와 같이 만큼 진위상의 $\dot{E}_1'$으로 되어 차 기전력 $\dot{E}_s$가 발생된다.
2) 그림 Ⅳ−16의 (c)에서 이때의 차 기전력 $\dot{E}_s$에 의하여 측에서 I_s가 흐르고 출력 $\dot{E}_1'\dot{I}_s'$가 증가하므로 G_1의 회전 속도는 감소한다. 이때, G_2 쪽의 출력은 $\dot{E}_2\dot{I}_s$만큼 출력 부담이 감소되므로 회전 속도는 상승한다. 즉, G_1이 G_2에 전력을 공급하게 되어, 결국 그림 Ⅳ−16의 (d)와 같이 된다.
3) 전류 $\dot{I}_s'$를 동기화 전류(Synchronizing current)라고 하며, 이때의 전력을 동기화 전력(Synchronizing power)이라고 한다.

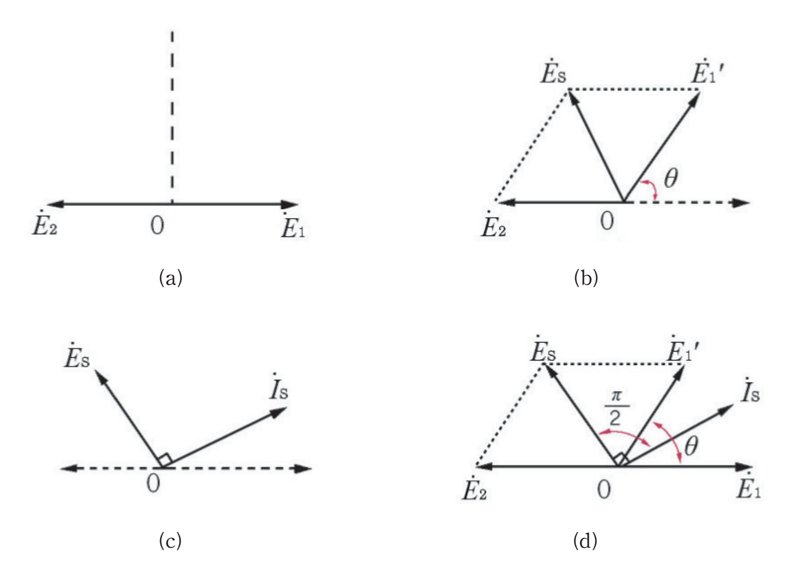


그림 Ⅳ−16 동기 발전기의 계자 증가에 의한 불평형 운전 벡터도

(4) 유도 기전력의 파형이 같을 것

두 발전기의 기전력의 실효값과 위상이 서로 같다고 하더라도 그 파형이 서로 다르면, 순시 기전력의 크기가 같지 않기 때문에 무효 순환 전류가 흘러 전기자 권선의 저항손이 증가하여 과열의 원인이 될 때가 있다.

2. 난조와 난조 방지법

병렬 운전 발전기의 부하가 급변하면 발전기는 새로운 부하에 대응하는 속도가 되려고 한다. 그러나 회전체의 관성 때문에 발전기의 축은 새로운 부하각을 중심으로 진동을 반복하게 된다. 이때, 동기기의 고유 진동수 근처에서 공진 작용에 의한 진동이 증대한다. 이러한 현상을 난조(hunting)라고 한다.

난조의 정도가 커지면 결국에는 동기 운전을 이탈하게 되는데, 이것을 동기 이탈 또는 탈조라고 한다. 난조를 방지 하기 위하여는 자극 면에 유도 전동기의 농형 권선과 같은 단락 도체를 설치하여 유도 전류를 발생시킴으로써 토크를 만들어 난조를 방지하는 작용을 하게 한다. 이 권선을 제동 권선이라고 한다.

예제 2 정격 전압 220〔V〕의 동기 발전기를 무부하로 운전하였을 때의 단자 전압이 253〔V〕이었다. 이 발전기의 전압 변동률을 구하여라.

풀이 |

정격 단자 전압을 V_n〔V〕, 출력 전압을 V_0〔V〕라고 하였을 때, 전압 변동률은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100[\%] = \frac{253-220}{220} \times 100[\%] = 15[\%]$$이다.

예제 3 극수 6, 회전수 1200〔rpm〕의 교류 발전기와 병렬 운전하는 극수 8의 교류 발전기의 회전수를 구하여 설명하여라.

풀이 |

두 발전기는 주파수가 동일하여야 한다. 극수 6, 회전수 1200〔rpm〕의 발전기 주파수는 $N_s = \frac{120f}{p}$ 의 공식을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$f = \frac{N_s \times P}{120} = \frac{1200 \times 6}{120} = 60[\text{Hz}]$$

그러므로 극수 8의 교류 발전기의 회전수는 $N_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 60}{8} = 900[\text{rpm}]$ 이 된다.

실습 과제

무부하 특성 시험

<도면>

다음은 동기 발전기의 무부하와 단락 시험을 위한 접속도와 결선도이다.

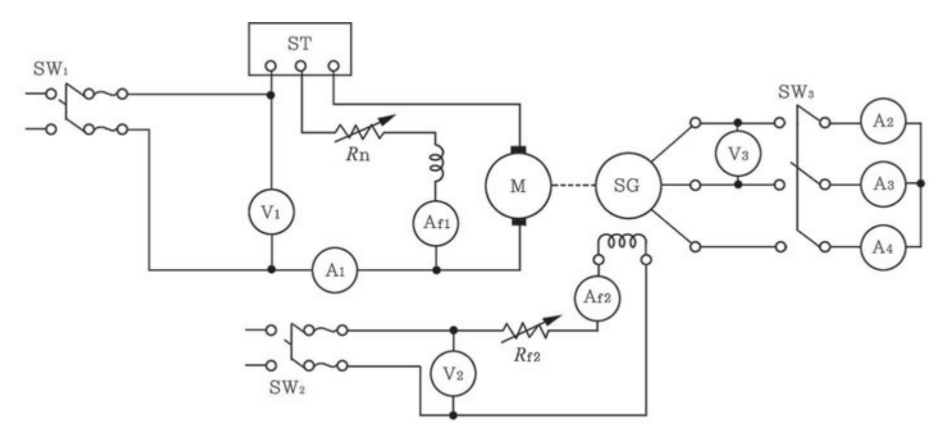


그림 Ⅳ-17 동기 발전기의 무부하와 단락 시험 결선도

사용 재료와 기기

3상 동기 발전기(3상 380[V] 1000[W]) 1대, 단상 220V, 3상 380V 전원(3[KVA]) 상용 전원, 기동기 박스(3상 380[V] 10[A]) 1대, 직류 분권 전동기(단상 220[V] 10[A]) 1대, 전류계(단상 교류 0~30[A]) 6대, 전압계(단상 교류 0~440[V]) 3대, 속도계(0~5000[rpm]) 1대, 계자 저항기, 외부 저항기(분권 전동기 기동용) 1대, 전원 스위치(3상, 단상[50A]) 3개

안전과 유의 사항

1. 시험 중에서 회전수는 항상 일정하게 유지하고 주파수계로 정격 주파수가 된 것을 확인한다.
2. 단락 시험에서는 전류계의 전류 용량이 큰 것을 이용하고, 계자 저항기 외에 외부 저항기를 부가하거나 여자 전압을 적당한 값으로 강하시켜야 한다.

실습 순서

1. 그림 Ⅳ-17과 같이 결선하고 확인한다.
2. 계자 저항기 R_{f2}의 값을 최대로 하여 계자 전류가 최소 상태에서 스위치 SW_2, SW_3을 열어 두고 전동기 Ⓜ을 기동하여 동기 발전기 ⓈⒼ를 정격 속도로 한다.

3. 스위치 SW_2를 닫고, 계자 저항기 R_{f2}를 조정하여 발전기에 정격 전압을 유지시킨다.

4. 전동기의 계자 전류를 변화시켜 발전기의 회전수를 변화시켜 가면서 가변되는 주파수 f의 지시값과 회전수를 측정하여 기록한다.

5. 계자 저항기 R_{f2}를 최대로 한 상태에서, 스위치 SW_2를 열고 정격 회전수로 운전하여, 전압계 V_3의 값을 측정 · 기록한다.

6. 스위치 SW_2를 닫고 계자 전류 I_f를 점차 증가시켜 각 여자 전류에 따른 유도 기전력을 측정한다. 유도 기전력이 125[%] 정도에 이르면 다시 계자 전류를 0까지 감소시키면서 각 계자 전류에 따른 유도 기전력을 측정하여 기록한다.

7. 무부하 특성 곡선을 그린다.

결과 정리

- 3상 동기 발전기의 무부하 특성
- 정격 회전수 ________________ [rpm]
- 정격 전압 ________________ [V]

회전수 N[rpm]	주파수 f[Hz]	여자 전류 I_f[V]	유도 전압 E_0[V]	비고



동기 전동기 특성과 특수 전동기

학습 목표 |

1. 동기 전동기의 기동 토크의 발생 원리를 설명할 수 있다.
2. 특수 전동기의 원리를 설명할 수 있다.

1 동기 전동기의 기동 토크

3상 전원 전류가 그림 Ⅳ−18과 같이 동기 전동기의 고정자에 공급될 때, 고정자가 만드는 자기력선속은 그림 Ⅳ−19의 (a)와 같이 N극에서 S극으로 시계 방향의 회전 자기장으로서 N_s의 속도로 발생한다.

그림 Ⅳ−18의 ωt_1 시점에서 $i_u(-)$, $i_v(+)$, $i_w(+)$의 전류가 권선 u, v, w에 흐른다. 고정자 전류가 만드는 자기장은 그림 Ⅳ−19의 (a)와 같이 점선으로 된 상하 대칭의 반원을 구성하고 수평선을 기준으로 N극과 S극으로 구성된다. 그림 Ⅳ−19의 (b), (c), (d)에서 동기 전동기의 발생 토크를 회전자의 위치에 따라 살펴보면 다음과 같다.

- 무부하에서, 그림 Ⅳ−19의 (a)와 같이 고정자가 만드는 자극에 의하여 회전자는 그림 (b)와 같이 N→S→N→S로 배열된다. 따라서, 자기력선속의 방향은 회전자와 고정자가 일치한다.
- 이때, 그림 Ⅳ−19의 (c)와 같이 권선 w와 권선 v'가 만드는 고정자 N극과 S극 사이에서 발생되는 플레밍의 왼손 법칙의 힘은 각각 F_1과 F_2로 서로 반대 방향으로 발생된다. 이 순간은 $F_1=F_2$로 회전력은 0이 된다.

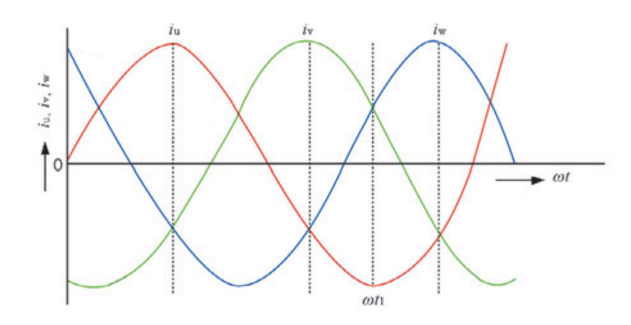
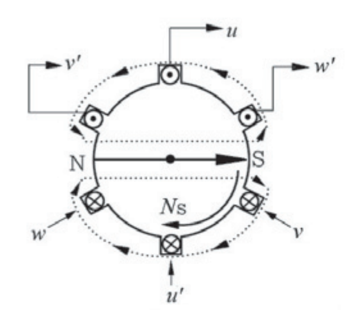
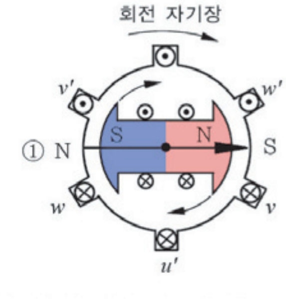


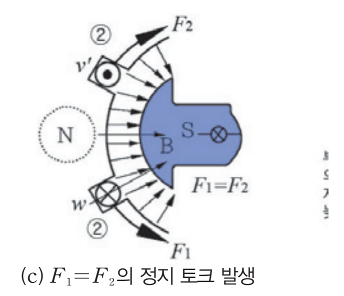
그림 Ⅳ−18 동기 전동기의 3상 전원 전류 파형



(a) 고정자 3상 입력 ωt_1일 때의 순시 합성 자기장



(b) 무부하인 경우에 회전자극 S-N과 고정자 회전 자기장 N→S→N→S→N→S의 일치



(c) $F_1=F_2$의 정지 토크 발생

부하 각에 의하여 회전 자극이 늦어진다.

(d) 부하각 δ에 의한 회전자 이동이 $F_1>F_2$되게 함.

그림 Ⅳ-19 동기 전동기의 기동 토크 발생

- F_1과 F_2를 다르게 하고 F_1과 F_2 중에서 큰 방향으로 회전력을 얻기 위하여 회전자에 부하를 가한다. 그러면 회전자는 그림 Ⅳ-19의 (d)와 같이 부하각 δ만큼 회전자 축이 고정자극 N 앞에서 어긋나게 된다.
- 따라서, $F_1>F_2$로 되고 고정자는 시계 반대 방향으로 움직여야 한다. 그러나 고정자는 고정되어 있으므로 회전자가 시계 방향으로 회전 토크를 얻는다.

2 특수 전동기

1. 브러시리스 직류 서보 전동기

직류 전동기는 효율이 좋고 속도와 위치 제어용으로 많이 쓰인다. 그러나 직류 전동기는 브러시와 정류자편을 통하여 전력을 전달할 때, 불꽃과 노이즈가 발생하는 단점이 있으므로 브러시리스(Brushless, 브러시가 없는) 동기 전동기를 직류 전동기의 대용으로 활용한다.

브러시리스 직류 서보 전동기는 그림 Ⅳ-20과 같은 제어 회로에 의하여 운전된다.

- 그림 Ⅳ-20의 ①에서와 같이 고정자에 3상 권선을 가지는 동기 전동기를 설치한다.
- 그림 Ⅳ-20의 ②(3상 인버터)에 의하여 가변 주파수, 가변 전압의 전원을 공급한다.

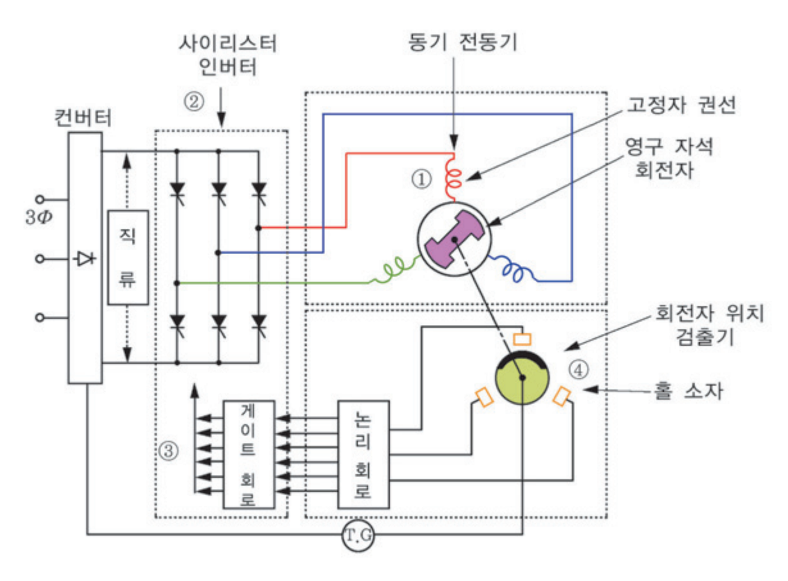


그림 Ⅳ-20 브러시리스 동기 전동기의 구동 회로 구성

- 고정자 권선을 사이리스터 게이트 회로에 의하여 순차적으로 3상 여자시킨다.
- 회전자 측에서는 홀 소자 등에 의하여 회전자의 위치와 타코 제네레이터(tacho generator)에 의하여 위상을 검출한다. 그리고 각각의 게이트 회로와 전원 쪽 컨버터로 다시 신호를 보내어 순시 위치와 속도를 정밀 제어할 수 있다.

2. 리니어 동기 전동기

대부분의 일반 전동기는 회전 운동을 한다. 그러나 직선 운동을 하는 전동기가 있는데, 이를 리니어 전동기(linear motor)라고 한다. 종류에는 리니어 유도 전동기(linear induction motor), 리니어 동기 전동기(linear synchronous motor), 리니어 직류 전동기(linear direct motor), 리니어 펄스 전동기(linear pulse motor) 등이 있다.

- 리니어 동기 전동기의 구동 원리는 그림 Ⅳ-21과 같이 아래쪽에 고정자를 마치

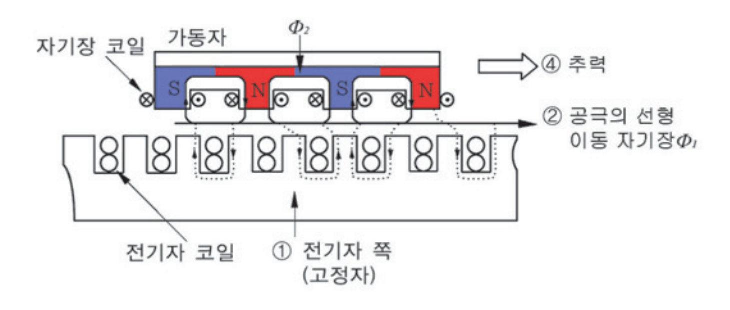


그림 Ⅳ-21 리니어 동기 전동기의 원리

동기 전동기의 원형 전기자를 반경 방향으로 끊어 펼쳐서 평판형으로 설치한 것과 같이 설치한다. 그리고 3상 권선을 설치하여 교류 전압을 공급한다.

- 그림 Ⅳ-21의 전기자에서 회전 자기장을 발생시키면 평판 전기자 앞의 공극에는 선형 이동 자기장이 Φ_1으로 나타난다.
- 상부의 영구 자석 N-S와 가동자 권선에 의한 순시 스텝 자기력선속이 부가된 계자(가동자) 속 Φ_2가 아래의 선형 이동 자기장 Φ_1과 상호 응력을 만든다.
- 이때, Φ_1과 Φ_2의 상호 응력에 의하여 직선 방향으로 추력을 발생시킨다.

3. 소형 직류 전동기

소형의 직류 전동기(direct current motor)는 고정자에 영구 자석을 사용한 것이 대부분이다. 영구 자석에 의하여 생기는 자기장 내에 회전자를 두고 회전자 권선에 전류를 흘려서 토크를 발생시킨다. 여기서, 자석의 재료는 철(Fe)을 주체로 하여 알루미늄(Al), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등과 같은 알리코계의 주조 자석강과 페라이트계 자석강이 주로 쓰이고 있다.

직류 전동기는 회전자 권선에 가하여는 직류 전압의 크기와 극성을 바꾸어 줌으로써 속도 또는 회전 방향을 쉽게 바꿀 수 있다. 또, 효율이 좋고 속응성이 높은 장점을 가지고 있다. 따라서, 자기 테이프 장치, 자기 디스크 장치, 컴퓨터 주변 장치, NC 머신, 산업용 로봇, 계측기, 의료 기기 등에 널리 쓰이고 있다.

(1) 회전자 슬롯형 직류 전동기

회전자 슬롯형 직류 전동기(slotted core dc motor)는 그림 Ⅳ-22와 같이 회전자는 적층 철심으로 되어 있고, 그 둘레에 타원형의 슬롯이 있다. 이 전동기는 권선의 절연이 간단하므로 소형화할 수 있다. 단점으로는 회전 미동을 일으키기 쉽다.

(2) 회전자 무슬롯형 직류 전동기

회전자 무슬롯형 직류 전동기(slottless dc motor)는 회전자 철심을 가늘고 길게 하여 관성을 적게 한 것이며, 공극의 자기력선속 밀도를 높이기 위하여 슬롯을 설치하지 않는다. 그림 Ⅳ-23과 같은 원통형의 적층 철심의 표면에 회전자 권선을 균일하게 병렬로 설치하고 내열성이 뛰어난 에폭시 수지 또는 유리 테이프 등으로 고정한다. 이 전동기는 회전자의 슬롯이 없기 때문에 회전 미동이 거의 없는 것이 장점이다.

4. 소형 교류 전동기

교류 전동기(alternating-current motor)에는 정류자형과 회전 계자형이 있다. 그 원리는 교류 전류를 고정자 권선에 가하여 발생되는 회전 자기장과 회전자 권선에서 발생되는 유도 전류 사이에서 토크가 발생되는 것을 이용한 것이다.

동기 전동기(synchronous motor)에는 회전자의 구조에 따라 릴럭턴스형, 영구 자석형, 히스테리시스형이 있다. 이것은 동기 속도로서 정속 운전이 되는 것이 그 특징이다. 시계, 계측기, 자기 디스크 장치, 비디오테이프 레코드, 레이저 주사 장치, 영사기 등에 쓰인다.

(1) 영구 자석 동기 전동기

영구 자석 동기 전동기의 고정자는 회전 자기장을 만드는 권선이 설치되고 회전자는 그림 Ⅳ－24와 같이 회전자 중심부에 영구 자석을 설치하고 그 둘레에 농형 권선을 삽입하여 두고 있다. 구조가 간단하고, 릴럭턴스 전동기에 비하여 역률과 효율이 좋은 것이 장점이다. 음향 기기, 컴퓨터 주변 기기, 의료 기기 등의 일정 회전 속도를 필요로 하는 곳에서 쓰이고 있다.

(2) 히스테리시스 전동기

히스테리시스 전동기(Hysterisis motor)의 회전자는 그림 Ⅳ－25와 같이 히스테리시스 손실이 큰 자성 재료로 만들어지며, 원통형이다.

영구 자석 동기 전동기 회전자에서는 회전자 내부에 영구 자석을 설치하여 최초부터 자화되어 있으나, 히스테리시스 전동기의 경우에는 고정자 회전 자기장으로부터 회전자가 자화된다. 용도는 기록계의 용지 회전, 캠기구 등에 쓰인다.

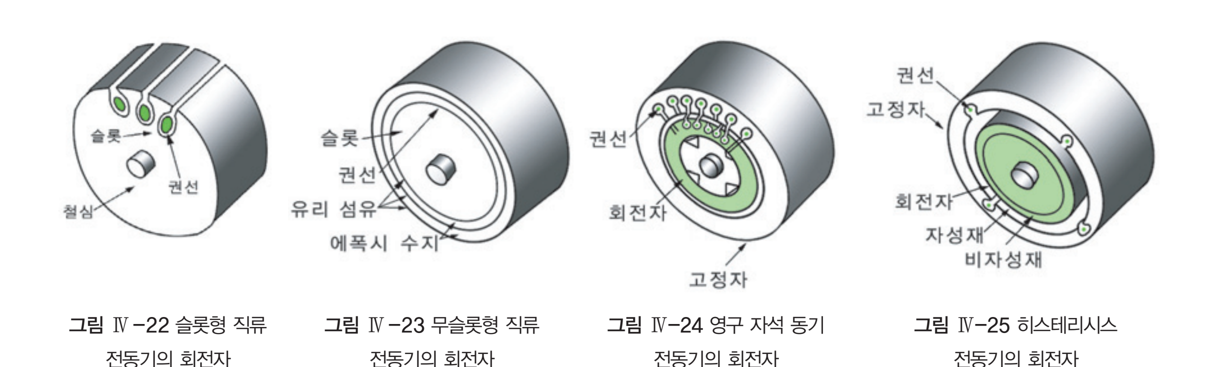


그림 Ⅳ－22 슬롯형 직류 전동기의 회전자

그림 Ⅳ－23 무슬롯형 직류 전동기의 회전자

그림 Ⅳ－24 영구 자석 동기 전동기의 회전자

그림 Ⅳ－25 히스테리시스 전동기의 회전자

단원 종합 문제

1 브러시리스 직류 서버 전동기의 특징이 아닌 것은?

① 직류 전동기의 단점인 브러시를 제거한 동기 전동기이다.
② 고정자 권선을 사이리스터 게이트 회로에 의하여 순차적으로 3상 여자시킨다.
③ 위치와 속도를 제어하기가 용이하다.
④ 회전자 측에 위치 검출기가 있다.
⑤ 고정자와 회전자가 동일한 구조로 되어 있다.

2 동기 전동기의 기동 조건에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 동기 전동기는 무부하 조건에서 부하각이 0이므로 기동 토크가 없다.
② 동기 전동기는 고정자 권선에 기동 권선을 설치하여 유도 자기장에 의하여 기동된다.
③ 회전자가 회전 토크를 유지하기 위하여 항상 부하각을 유지시킨다.
④ 회전자는 회전 자기장에 끌려가면서 추적하며 회전한다.
⑤ 동기 전동기는 기동 회전력을 얻기 위하여 기동 콘덴서가 부착되어 있다.

3 동기 전동기에서 회전자는 동기 속도로 회전한다. 회전 손실과 부하가 걸리면 동기 속도에서 감속된다. 어떻게 동기 속도로 유지하는가?

① 동기 전동기의 1차 측 전기자 전류를 증가시킨다.
② 2차 측 회전자 권선의 여자 전류를 증가시킨다.
③ 부하를 감소시키는 수밖에 없다.
④ 동기 전동기의 1차 측 전기자 전류를 감소시킨다.
⑤ 동기 전동기의 2차 측 회전자 권선의 여자 전류를 감소시킨다.

4 동기 발전기에서 돌발 단락이란 무엇인가?

① 동기 발전기의 회전자와 고정자의 마찰로 발생하는 현상이다.
② 3상 동기 발전기의 전기자 출력쪽을 전부 단락하고 계자 전류를 증가시킬 때의 불평형 단락 전류를 말한다.
③ 부하가 급작히 늘어나 전류가 상승하는 현상이다.
④ 동기 발전기의 전기자 권선이 권선 상호간 절연 파괴로 단락 접속 또는 접지되어 순시적으로 대전류가 흐르는 현상이다.
⑤ 동기 발전기의 전압이 순간적으로 높아지는 현상이다.

정답 | 1 ⑤　2 ⑤　3 ②　4 ④　5 ②　6 ③　7 ⑤　8 ③

5 동기 전동기의 전기자 반작용의 설명으로 옳지 않은 것은?

① 전류가 90°만큼 뒤진 때에는 감자 작용을 한다.
② 전기자 전류의 세기에 따라 다르다.
③ 동상인 부하 전류는 교차 자화 작용으로 주자속을 편자하게 하는 횡축 반작용을 한다.
④ 유기 기전력과 전기자 전류 사이의 위상 관계와는 관계없다.
⑤ 전류가 90°만큼 앞선 때에는 증자 작용을 한다.

6 전압 변동률이 작은 동기 발전기의 특징은?

① 동기 리액턴스가 크다.
② 전기자 반작용이 크다.
③ 단락비가 크다.
④ 전압 변동률이 작을수록 나쁘다.
⑤ 부하를 걸면 전압이 많이 변동한다.

7 단락비가 큰 동기기의 특징을 바르게 설명한 것은?

① 전기자 반작용이 크다.
② 동기 임피던스가 크다.
③ 과부하 내량이 작다.
④ 동기계로 불린다.
⑤ 전압 변동률이 작다.

8 동기 발전기의 병렬 운전 조건과 관계없는 사항은?

① 유도 기전력의 주파수가 동일할 것
② 유도 기전력의 위상이 동일할 것
③ 동기 발전기의 용량이 동일할 것
④ 유도 기전력의 크기가 동일할 것
⑤ 유도 기전력의 파형이 동일할 것

인용 및 참고 문헌

- 김상진(1998). 최신 전기 기기. 서울: 세화. pp. 87~138
- 김영조, 신재화(2004). 소형 모터. 서울: 보문당. pp. 63~340
- 이용길 외(1998). 전기 기기. 서울: 광명. pp. 306~314
- 정승기, 이향범(2003). 전기 기기. 서울: 사이텍미디어. pp. 140~400
- 松井信行(1990). 電氣器機. 日本: 森化出版. pp. 82~112
- 新井芳明 외(1999). 電氣·電子實習. 日本: 實敎出版. pp. pp. 87~138
- 梅木 一良 외(1999). 實習 電氣器機. 日本: OHM社. pp. 79~92
- 五十嵐 孝仁(1999). 標準 電氣器機. 日本: OHM社. pp. 179~213